報告日　２０１３年（平成２５年）　８月２８日

報告者　　東京大学　情報理工学系研究科　助教

神永　拓

１．　研究概要

（和文）

(1)課題名（日本語）

ロボット関節用スクリューポンプ静油圧アクチュエータの研究

(2)研究者氏名

神永　拓　東京大学　大学院情報理工学系研究科　知能機械情報学専攻　助教

(3)研究概要（日本文）

ロボットシステムの力感受性を高めるためには駆動系の低摩擦化を図り，バックドライバビリティに優れる駆動系を実現しなければならない．本研究ではロボットシステムの力感受性を高める，単条の低摩擦スクリューポンプを用いた静油圧アクチュエータを実現することを目的とし，スクリューポンプの設計を行った．試作したポンプの単体特性を評価するとともに油圧モータと組み合わせることで電気静油圧アクチュエータを構成し，その力感受性に関する評価と制御系を構成した際の力感受性を評価した．

(4)キーワード

バックドライバビリティ，ねじポンプ，力制御，静油圧駆動

（英文）

(1) Research title

Screw pump driven hydrostatic actuator for robot actuation

(2) Name of researcher with title of position

Hiroshi Kaminaga, Assistant Professor, Department of Mechano-Informatics, Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

(3) Summary

For a robot system to be force sensitive, enhancement of backdrivability in actuation system is necessary; it requires reduction of friction in the transmission system. In this research, we developed a prototype of low friction single thread screw pump for driving robot joint to enhance backdrivability of a robot system. The prototype was evaluated as a pump, and then evaluated as an actuation system by combining it with a vane motor.

(4) Key Words

Backdrivability, Screw Pump, Force Control, Hydrostatic Actuator

２．本研究の意義・特色

駆動系のバックドライバビリティを高めるためにはモータ側のダイナミクスとリンク側のダイナミクスを分離することが有効である．筆者らはこれまでの研究で電気静油圧アクチュエータ（EHA）によりバックドライバビリティを高められることやダイナミクスの分離が可能であることを示してきた．EHA の基本構造を図１に示す．

EHA においてバックドライバビリティを劣化させる原因となるのは油圧コンポーネントでの摩擦である．特に静止摩擦やクーロン摩擦といった固体摩擦はバックドライバビリティを損なう主原因である．これまでに油圧モータにおいては軸シール以外の固体摩擦をほぼ排除する構成法を提案してきた．ところが，一般的な小型高圧ポンプは容積型（歯車ポンプ，ベーンポンプ，ピストンポンプなど）であり，いずれも大きな固体摩擦を伴う上，部品点数が多く複雑化が避けられない．また，いずれも圧力に脈動があり，制御性能を損ねていた．筆者らの過去の研究では歯車同士のすべり速度が小さく摩擦の影響が比較的少ないトロコイドポンプを採用してきたものの，脈動は存在し，固体摩擦も本質的な解決には至っていなかった．

これに対して，ターボポンプは部品点数が少なく，機械的噛み合いが無く固体摩擦を低減する事が期待できるといった長所をもつ反面，加工精度が要求されるため，これまでは高粘度の流体を低圧力で圧送するために用いられることが多かった．

しかし，ターボポンプ，特に粘性を用いるスクリューポンプは形状が歯車などに比べ単純であり，筆者らが今まで低摩擦化のために行ってきた設計法を応用し，現在実現可能な加工精度をあわせれば，EHA 駆動で求められる流量・圧力を発生することが可能であることがわかってきた．さらに，容積変化を圧力に変換するのでなく，ロータと流体間の摩擦力を圧力に変換するという特性上脈動が無く，制御性能を改善することが期待できる．

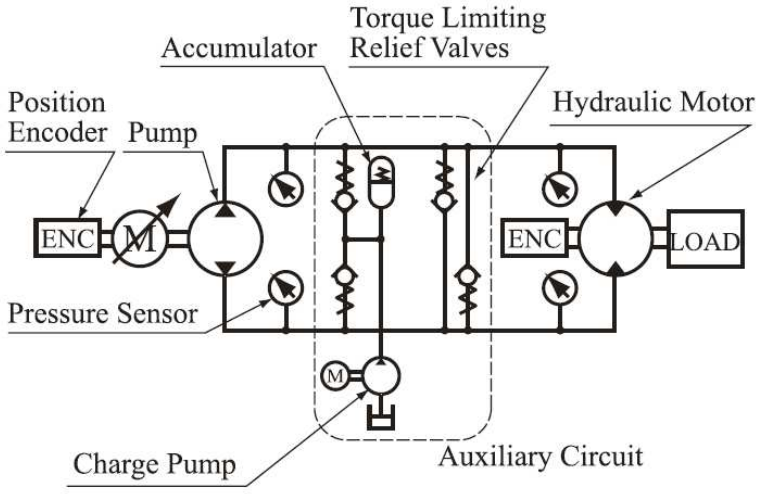

図１：EHA の基本構造

３．実施した研究の具体的内容、結果（本文）

粘性スクリューポンプ（以下スクリューポンプ）は図 2 に示すように円筒（スリーブ）内でねじ（スクリュー）が回転する構造，もしくは内ねじが円柱の周りを回転する構造を持つ．いずれの場合においても，ねじ溝内で流体がねじから受けるせん断力がねじ溝方向に圧力勾配を発生し，スクリュー両端における圧力差を生じる．逆にねじ溝内を流体が流れると，摩擦力によりトルクを生じ，スクリューを回転させることもできるため，圧力差とねじの回転力の間には双方向性がある．スクリューポンプは原理上機械的な接触を必要とせず，脈動を発生することもない．スクリューポンプに関する理論的な解析は浅沼の研究をはじめとして数例存在する．

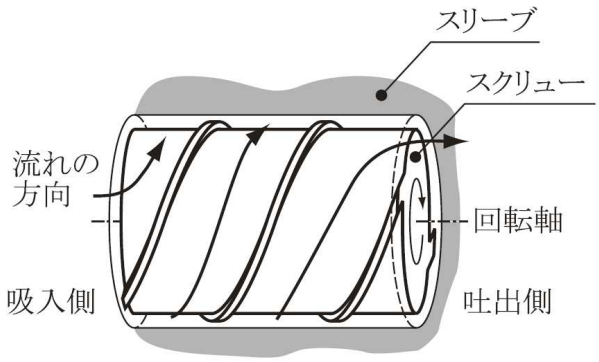

図 2：スクリューポンプの構造

本研究ではスクリューポンプを用いて機械的な仕事を行わせるため，表 1 に示す仕様を設計目標とした．本研究ではスクリューポンプの流体特性式，および機械工作的知見を用いて試行錯誤的に設計仕様を満たすパラメータを求めた．機械加工で実現可能な隙間や寸法も考慮して表２ に示す設計パラメータを導出した．作動流体としては 100cSt のシリコーンオイルを用いる．ねじ溝の形状としては三角溝が有効であることが報告されているが加工の精度を重視し矩形溝を用いることにした．モータに maxon motor a.g.の EC-4pole 100W を用いた際にピーク性能で上記使用を満たすことができることがシミュレーションにより確認された．

表１：設計仕様

最大吐出差圧	1.0 MPa
最大流量	30×10^{-6} m³/sec

設計したスクリューポンプの断面図ならびに外観をそれぞれ図３，図４に示す．

表２：設計結果

説明	値	単位
作動油動粘度(ν)	100	cSt
作動油密度(ρ)	882	kg/m^3
スクリュー軸長(l_t)	62	mm
スクリュー直径(d_t)	28	mm
ねじ溝幅(w_t)	9	mm
ねじ溝深さ(h_c)	0.5	mm
ねじ山幅(w_b)	1.0	mm
スクリュー間隙(h_g)	15	μ m
ねじ条数(n_t)	3	
モータ・ポンプ間減速比	2	

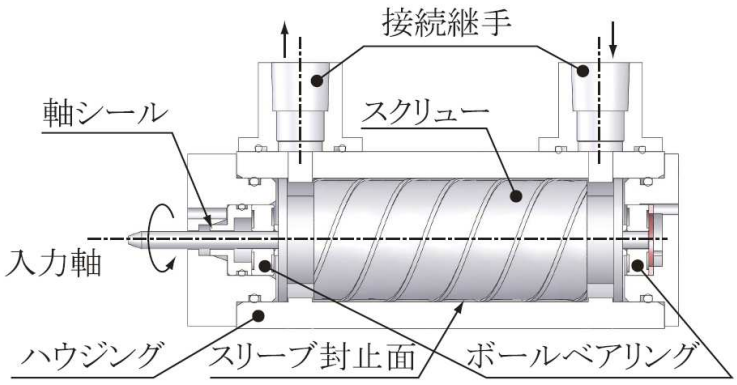

図３：設計したスクリューポンプの断面図

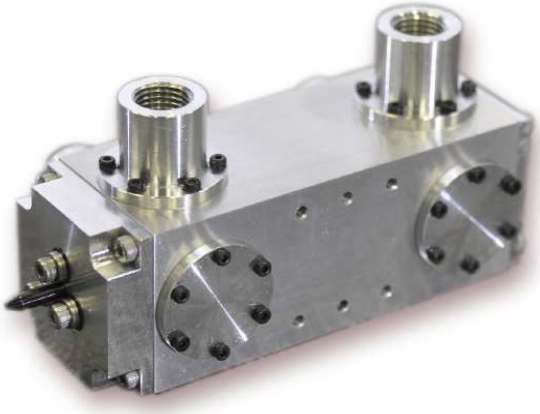

図４：設計したスクリューポンプの外観

評価実験として圧力ー流量特性，バックドライバビリティ，および脈動を調査した．

圧力ー流量特性はポンプを一定トルク制御した際にポンプの背圧を調整することで圧力，流量特性を記録した．スクリューポンプの圧力ー流量特性は直線になるはずであり，実験的にも高い直線性が確認された．実験結果から流量ー圧力で 26%，トルクー流量で 52% の誤差が観測されたが，モデル化誤差を考えると計算式は妥当であると考えられる．モデル化誤差は加工・組立誤差が大きく影響していると思われる．

スクリューポンプは原理的に脈動を生じない．この特性を評価するためにポンプの吐出口を封止したときの圧力の時系列データをトロコイドポンプとスクリューポンプで比較評価した．脈動の大きさはデータの標準偏差で評価した．結果からはスクリューポンプにも小さな脈動が見られた．トロコイドポンプとの違いとしては，トロコイドポンプの脈動は平均圧力が小さいときに大きく現れるのに対してスクリューポンプの脈動は圧力への依存性が小さい．したがって平均圧力が高いときの評価がスクリューポンプとしては最も不利になるが，この場合においてもスクリューポンプの脈動はトロコイドポンプの脈動の 70%に留まった．平均圧力が最も低い場合にはスクリューポンプの脈動はトロコイドポンプの脈動の 21%となり，低脈動性が確認された．スクリューポンプにおいても脈動が生じる原因としてはスクリューが偏芯していることが疑われる．偏芯があると回転角度により流体が受けるせん断力が不連続に変化する．

バックドライバビリティの評価では，ベーン型の油圧モータにスクリューポンプならびにトロコイドポンプを接続し，ベーンモータにトルクを印加した際にどの程度の印加トルクで EHA が逆駆動されポンプが回転を始めるかを調査したものである．実験結果を表３に示す．結果から同一ベーンモータを使用した場合にスクリューポンプはトロコイドポンプに比べ 32%の印加トルクで回転を始めることがわかり，高いバックドライバビリティが得られることが実験的にも確認された．

表３：バックドライバビリティ評価

	トロコイドポンプ型 EHA	スクリューポンプ EHA
全バックドライブトルク[Nm]	2.2	0.7

イナーシャスケーリングとはトルクフィードバックによってポンプ側の見かけの慣性を小さくする制御である．見かけの慣性をより小さくするには，フィードバックゲインをより高くする必要がある．しかしながら，見かけの慣性の最小値は普通，得られるトルク信号の質によって制限される．EHA では，発揮トルクは油圧モータの差圧に比例するため，トルクの直接測定値の代わりに差圧信号が用いられる．スクリューポンプでは脈動の少ない

滑らかな圧力信号が得られるため，トロコイドポンプ型 EHA よりもより大きなフィードバックゲインを使用し，より小さな見かけの慣性が得られることが期待される．

これまでの研究で，歯車型駆動系にトルクセンサを組み合わせた場合，経験的に見かけ上の慣性はフィードバックにより物理的な慣性の 1/5 程度まで低減できることがわかっている．トロコイドポンプ型 EHA では 1/10 程度まで慣性を低減できており，EHA の有効性が示されていた．これに対してスクリューポンプを用いた場合 1/20 程度まで低減できることが確認され脈動の小ささが有効に作用していることが確認された．

イナーシャスケーリングに加え，摩擦慮賞，コンプライアンス制御を組み合わせたインピーダンス制御を行った．実験から高い直線性が得られ，力制御系が構成できることが確認された．

以下本研究の結論である．

1．ロボットアクチュエータとしての EHA 駆動用スクリューポンプの設計法を考案し，試作を行った．
2．実機において圧力ー流量特性が線形になることを確認し，設計力の誤差が限定的であることを確認した．
3．スクリューポンプを用いることで駆動系のバックドライバビリティが高められることを確認した．
4．スクリューポンプの脈動がトロコイドポンプに比べて小さく，この特性を生かしたトルクフィードバックの性能が向上することを確認した．
5．インピーダンス制御系を構成することで，スクリューポンプ型 EHA が力制御に適した特性を持つことを実験的に示した．
6．一方で，スクリューポンプの容積効率は低く，トロコイドポンプを用いた場合の数分の１程度の出力しか得られないという欠点もわかった．この特性は溝部底面形状を変更することで流体に与えるせん断力を増すことや，リソグラフィーを用いてより微細な溝加工を行うことで大幅に改善する可能性はある．

これらの結果からスクリューポンプをロボット駆動系に用いることで力に敏感なロボットシステムを構成できる可能性を示した．

４．本研究を実施したグループに属するおもな研究者の氏名・役職名

神永　拓　　東京大学　助教
中村　仁彦　東京大学　教授

５．研究実施時期

２０１０年（平成２２年）　４月　１日から２０１１年（平成２３年）　３月３１日

６．本研究に関連して発表した主な論文等

国際学会（査読あり）

[1] Hiroshi Kaminaga, Hirokazu Tanaka, Kazuki Yasuda, and Yoshihiko Nakamura, "Viscous Pump for Highly Backdrivable Electro-Hydrostatic Actuator, " Proceedings of International Conference of Robotics and Automation, pp. 3751-3756, St. Paul, USA., May 14-18, 2012.

[2] Hiroshi Kaminaga, Hirokazu Tanaka, Kazuki Yasuda, and Yoshihiko Nakamura, "Screw Pump for Electro-Hydrostatic Actuator that Enhances Backdrivability, " Proceedings of 11th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp. 434-439, Bled, Slovenia, October 26-28, 2011.

国内学会（査読あり）

[3] 神永拓，田中宏和，安田和樹，中村仁彦：”低粘度作動流体を用いる粘性スクリューポンプの開発と電気静油圧アクチュエータの制御”，第 17 回ロボティクスシンポジア予稿集, pp.148-155，山口県萩市，3 月 14 日―3 月 15 日，2012.

国内学会（査読なし）

[4] 神永拓，田中宏和，安田和樹，中村仁彦：”静油圧アクチュエータの固体摩擦を最小化する粘性型スクリューポンプの開発”, 第２９回日本ロボット学会学術講演会, 3K3-1, 芝浦工業大学，9 月 7-9 日，2011.

７．内外における関連研究の状況

ポンプとしての研究は

N. Tesla, “Turbine,” United States Patent No.1061206,1913.

が最も古い部類に属し，

H. S. Rowell and D. Finlayson, “Screw Viscosity Pumps,” Engineering, vol. 114, pp. 606–607, 1922.

などがある．

国内では

浅沼強：“粘性流体による密封作用に関する研究: 第 1 報ねじ型粘性ポンプのポンプ性能”, 日本機械学會論文集, Vol. 17, No. 60, pp. 119-125, 1951.

浅沼強：“粘性流体による密封作用に関する研究: 第 2 報ねじ型粘性ポンプの密封性能”, 日本機械学會論文集,Vol. 17, No. 60, pp. 126–130, 1951.

浅沼強：“粘性流体による密封作用に関する研究: 第 3 報ねじみぞ断面形状の影響について”, 日本機械学會論文集, Vol. 18, No. 66, pp. 35-40, 1952.

などがある．より近年では
M. L. Booy, “Influence of Channel Curvature on Flow, Pressure Distribution, and Power Requirements of Screw Pumps and Melt Extruders,” Trans. ASME J. of Engineering for Industry, vol. 86, pp. 23–30, 1964
H. G. Elrod, “Some Refinements of the Theory of the Viscous Screw Pump,” Trans. ASME J. of Lubrication Technology, vol. 94, pp. 83–93, 1973.
などがあるが，いずれもポンプに関する研究であり，アクチュエータ駆動用デバイスとしての研究は認められない．

８．今後の発展に対する希望
現時点でスクリューポンプの容積効率は低く，トロコイドポンプを用いた場合の数分の１程度の出力しか得られていない．これは開発した単純なスクリューを用いる限りかえることが難しい．ただし，スクリューポンプの吐出圧力はスクリューから流体が受け取る線弾力であり，溝部底面の形状によってはより大きなせん断力を得られる．たとえば，溝底の表面粗さや凹凸形状により，大きなせん断力を得られる可能性がある．また，溝の深さや幅も機械加工では選択範囲が狭く，微細加工が可能になれば更なる特性向上が期待できる．

ただし，このような加工は単純な切削加工では難しい．そこで，ラピッドプロトタイピングなどの造形方法を用いることや，溝加工を切削ではなくフォトリソグラフィーを用いれば現在より 1~2 桁微細な加工が可能になるため，多用な設計が可能になることを期待している．